0254-6124/2024/44(2)-0193-22 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JI Jianghui, LI Haitao, ZHANG Junbo, LI Dong, FANG Liang, WANG Su, DENG Lei, CHEN Guo, LI Fei, DONG Yao, LI Baoquan, GAO Xiaodong, XIAN Hao. Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES): an Astrometry Mission for Probing Nearby Habitable Planets (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(2): 193–214. DOI:10.11728/cjss2024.02.yg03

近邻宜居行星巡天计划: 利用空间天体测量法寻找下一个“地球”*

季江徽[1,2,3] 李海涛[4,5] 张俊波[6,7] 李 东[8]
方 亮[6] 王 素[1,2,3] 邓 雷[8] 陈 果[1,2,3] 李 飞[8]
董 瑶[1,3] 李保权[4,5] 高晓东[6] 鲜 浩[5,6,7]

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

2(中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

3(中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)

4(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

5(中国科学院大学 北京 100049)

6(中国科学院光电技术研究所 成都 610209)

7(自适应光学全国重点实验室 成都 610209)

8(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201306)

摘 要 近邻宜居行星巡天计划 (Closeby Habitable Exoplanet Survey, CHES) 采用空间微角秒级别的高精度天体测量技术, 普查太阳系近邻 (10 pc 内) 约 100 颗 FGK 等类型恒星, 探测宜居带类地行星或超级地球; 详细普查宜居行星的数目、真实质量和三维轨道等信息, 这将是国际上首次近邻宜居带类地行星的空间探测任务. CHES 的有效载荷是一台口径为 1.2 m, 视场为 $0.44^\circ\times0.44^\circ$, 焦距为 36 m 的高像质、低畸变、高稳定光学望远镜, 采用同轴三反 TMA 光学成像系统. 为实现宜居带类地行星探测, CHES 任务中的测量精度为 1 μas, 是目前国际测量精度最高的空间探测项目. 在空间科学先导专项背景型号项目的支持下, CHES 团队深入凝练和论证科学目标, 成功突破了三项关键技术难题: 实现了畸变大视场高像质空间望远镜光学系统技术的重要突破; 突破了 10^{-5} pixel 级别星间距测量技术; 实现了卫星系统高稳定度姿态控制精度及热控精度的创新. CHES 预计发现 50 颗类地行星, 引领中国空间科学探测技术的跨越式发展.

关键词 高精度天体测量法, 系外行星, 近邻宜居行星

中图分类号 P12

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (二期) 背景型号项目 (XDA 15020800), 国家自然科学基金项目 (12033010, 12073084, 12150009) 和紫金山天文台小行星基金会项目共同资助

2024-01-01 收到原稿, 2024-03-03 收到修定稿

Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES): an Astrometry Mission for Probing Nearby Habitable Planets

JI Jianghui[1,2,3] LI Haitao[4,5] ZHANG Junbo[6,7] LI Dong[8]
FANG Liang[6] WANG Su[1,2,3] DENG Lei[8] CHEN Guo[1,2,3] LI Fei[8]
DONG Yao[1,3] LI Baoquan[4,5] GAO Xiaodong[6] XIAN Hao[5,6,7]

1(*Purple Mountain Observatory*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210023)

2(*School of Astronomy and Space Science*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026)

3(*Key Laboratory of Planetary Sciences*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210023)

4(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

5(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

6(*Institute of Optics and Electronics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610209)

7(*National Laboratory on Adaptive Optics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610209)

8(*Innovation Academy for Microsatellites*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201306)

Abstract The Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES) employs state-of-the-art, high-precision astrometry and positioning technology at the microarcsecond level in space. Its primary objective is to conduct a thorough survey of approximately 100 FGK-type stars within the Sun's proximity (within 10 parsecs), with the goal of detecting potentially habitable Earth-like planets or super-Earths. This pioneering mission involves a detailed census of habitable planets, providing intricate information on their numbers, true masses, and three-dimensional orbits. Notably, CHES marks a historic milestone as the inaugural international space exploration mission exclusively dedicated to the study of terrestrial planets within the nearby habitable zone. CHES's payload features a cutting-edge optical telescope with a 1.2 m aperture, a field of view measuring 0.44°×0.44°, and a focal length of 36 m. The telescope utilizes a coa xial three-mirror TMA optical imaging system. Impressively, CHES is designed with a positioning measurement accuracy of 1 μas, solidifying its status as the most precise space exploration project globally in terms of positioning accuracy. To achieve the detection objectives of CHES, it is essential to refine and further substantiate the scientific goals through comprehensive argumentation. Overcoming three key technological challenges is crucial: advancing optical systems for large field of view, developing high-quality space telescopes with minimal distortion; breaking through measurement technology for stellar separations at the 10^{-5} pixel level; and achieving high stability in satellite system attitude control and thermal control precision. CHES stands on the threshold of groundbreaking discoveries, with the exciting prospect of revealing 50 Earth-like planets. This announces a significant leap forward in China's space science exploration technology.

Key words High-precision astrometry method, Exoplanets, Nearby Habitable Planets

0 引言

自 1995 年发现第一颗系外行星以来[1], 迄今已发现 5500 余颗系外行星[2]. 探索地外生命与系外宜居行星是天文学的基础研究前沿之一, 关乎“地球是否唯一”及“行星如何成为生命摇篮”等重大科学问题.

《美国天文和天体物理 2022−2031 十年规划》将寻找地球以外宜居行星列入未来探测计划的三大科学目标之一[3], 欧洲空间科学规划 (2035−2050, 远航 2050) 将“近邻宜居行星系统”探测作为重要科学目标[4]. 中国科学院与国家自然科学基金委员会《中国天文学 2035 发展战略》[5,6]、2021 年《“十四五”规划纲要和 2035 年远景目标纲要》与《2021 中国的航天》白皮书[7] 均指出宜居行星探测研究是国家重大战略需求. 因此, 系外宜居行星探测与研究直接面向世界科学前沿, 将揭示宇宙结构起源奥秘, 拓展地外生命与生命起源的新认知.

自 2000 年以来, 国际上已启动并实施了多个项目, 旨在进行系外行星的空间探测, 例如基于天体测量方法探测的 Gaia 卫星[8,9]、利用凌星法探测的 Kepler[10,11], TESS[12], CHEOPS[13] 与 JWST[14] 等任务; 近期或即将发射的任务包括利用直接成像法探测的 CSST 星冕仪[15], 基于微引力透镜方法探测的 Euclid[16], ROMAN[17] 及利用凌星法探测的 PLATO[18], ARIEL[19], LUVOIR[20] 等项目. 通过这些空间项目可以得知, 国际上系外行星探测的发展趋势已从个体的发现发展到对行星大样本的统计研究, 从对行星系统的宽泛认知逐渐转向对系外行星特征的精细刻画, 同时探测的前沿也从不同类型行星的搜索聚焦到宜居行星的寻找 (见图 1). 然而, 目前的空间任务仍然没有发现类日恒星周围宜居带内的类地行星, 因此中国要积极主动抢占系外宜居行星探测科技制高点.

图 2 给出了宜居行星探测路线, 从探测手段上来说, 宜居行星探测的技术路线趋势是从凌星法、天体测量法到直接成像法; 从探测对象的角度来看, 基于凌星法的项目 (例如 Kepler, TESS, PLATO) 分别致力于发现红矮星宜居带行星、近邻红矮星宜居带行星及类日恒星宜居带行星, 到利用天体测量法 (CHES[21]) 对近邻类日恒星周围宜居带行星的发现与刻画, 进而借助于直接成像法 (Habitable World Observatory (HWO), 觅音计划; 地基 E-ELT 等) 对近邻类日恒星宜居带行星大气的精细刻画与表征. 中国提出的近邻宜居行星巡天计划 (CHES[22]) 拟采用原创性技术路线, 通过空间高精度天体测量方法, 在近邻的类日恒星周围进行宜居行星的深入探测, 任务概况详见表 1[21]. 与凌星法相比, 在宜居带类地行星的探测上, CHES 在探测方法上具有独特优势 (见图 3). Kepler 和 TESS 这两个空间任务首先监测了超大的恒星样本 (10^7～10^9) 光变信号, 仅能发现行星轨道面与观测者视线方向平行的系外行星候选体, 且类地行

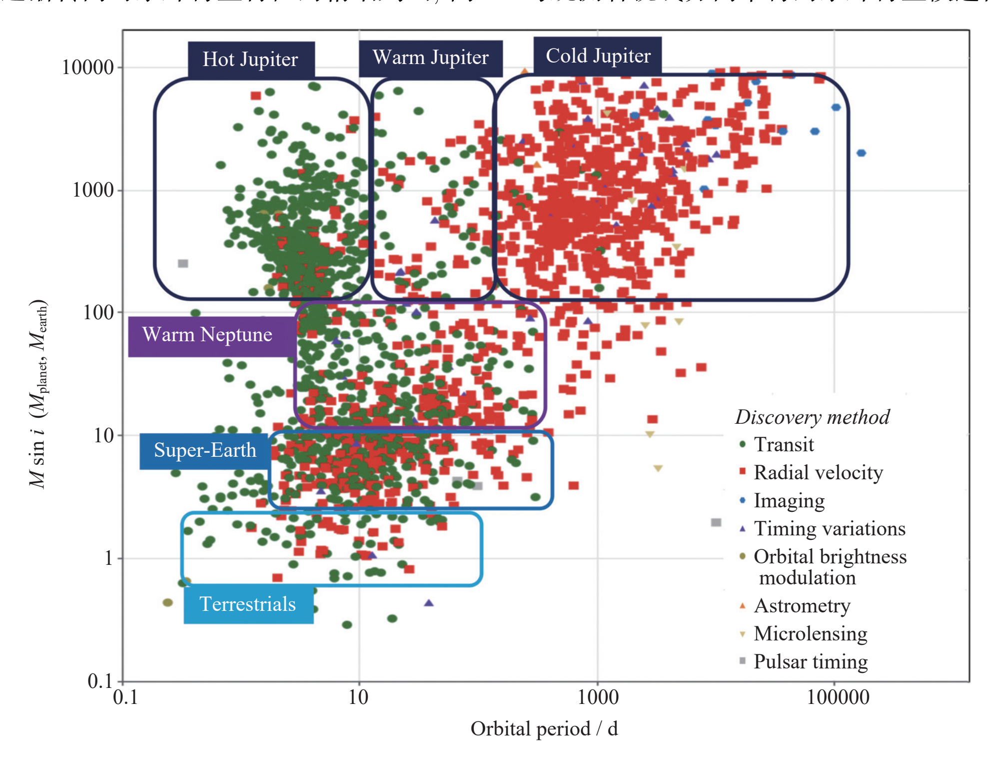


图 1　已发现系外行星的质量与轨道周期分布

Fig. 1　Distribution of mass-period of exoplanets observed so far

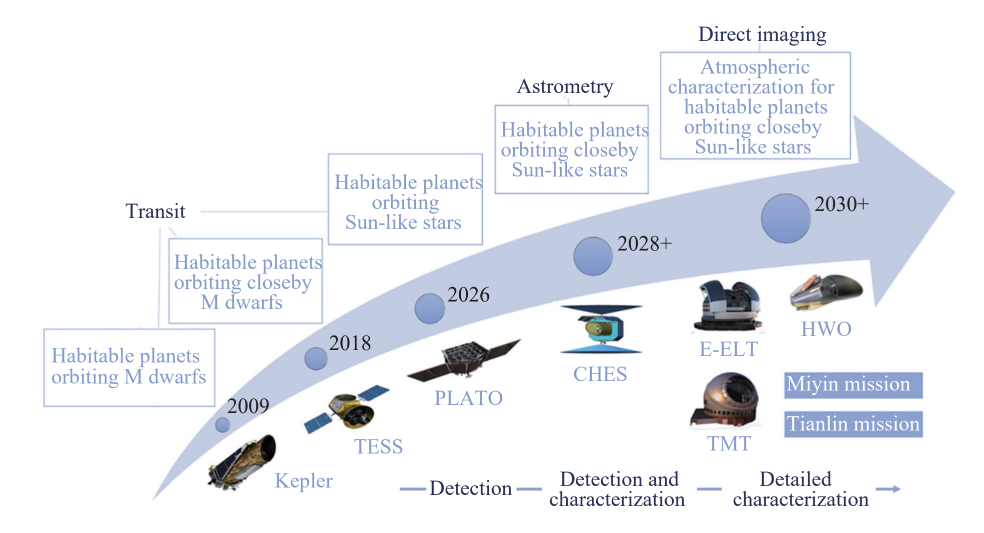


图 2 宜居行星探测路线图

Fig. 2 Road map of habitable planets detection

表 1 CHES 任务概况

Table 1 CHES mission outline

科学目标	在近邻类日系外行星中发现宜居行星 开展近邻行星建立全面普查 拓展科学目标: 宇宙学, 暗物质与黑洞研究
概述	航天器位于日地L2点运行5年 光学望远镜(500～900 nm), 微秒级天体测量(1 μas) 实现相对天体测量的观测策略
CHES具有的独特优势	空间超高精度的相对天体测量法0.3 μas (10 pc内的类日恒星的宜居带行星) 获得宜居类地行星的真实质量与三维轨道结构特征(含轨道倾角等) 研究近邻行星系统的统计特征
目标恒星	约10 pc 100颗F, G, K等类型恒星 拓展任务: 超微弱矮星系、X射线双星中的中子星等
有效载荷	同轴三反TMA光学成像系统 主镜直径: 1.2 m 焦距: 36 m 视场: 0.44°×0.44°
卫星	航天器质量: 1558 kg 发射质量: 2930 kg, 燃料质量(990+382 kg)

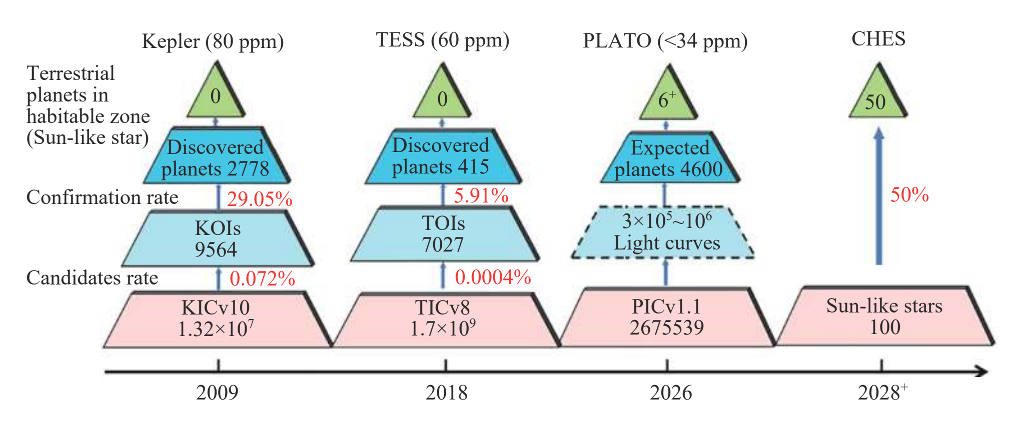


图 3 CHES 探测宜居带类地行星独特优势

Fig. 3 Unique advantages of detecting Earth-like planets in the habitable zone in CHES mission

星的凌星事件需要极高的测光精度 (60～80 ppm, PLATO 优于 34 ppm), 并最终依赖于地基超大口径望远镜的高精度视向速度仪的进一步证认. 而 CHES 则基于高精度天体测量法, 受恒星活动影响小, 对轨道构型几乎不受限制, 能够获得行星的三维轨道与真实质量; 宜居行星发现概率高, 预期会首次发现地球 2.0, 包括超过 50 颗宜居带类地行星与超级地球. 2030 年前后, 中国拟开展的宜居行星空间探测任务还有: ET 计划[23]、觅音计划[24] 和天邻计划[25]. ET 计划将利用凌星法与微引力透镜法, 对银河系内类地行星进行大规模普查. 觅音计划拟通过发射空间分布式合成孔径阵列望远镜, 以干涉直接成像的手段发现和证认系外宜居行星并刻画其宜居性. 天邻计划拟发射一台 6 m 级紫外光学红外空间望远镜, 将主要基于星冕仪直接成像法发现并刻画近邻恒星宜居带的岩石行星, 寻找潜在的生物特征.

CHES 为什么选择探测宜居带行星. 所谓宜居带 (habitable zone), 指的是恒星周围适宜生命存在的区域, 意味着在“宜居带”内行星表面平均温度能够维持液态水稳定存在[26], 同时恒星辐射与活动性不能太强, 以免破坏行星大气. 在太阳系, 地球的轨道位于金星与火星之间, 恰好处于太阳系的“宜居带”中. 目前, 天文学家已发现 69 颗宜居带行星 (见图 4), 例如比邻星 b(Proxima Centauri b)[27] 和 TRAPPIST-1 e, f, g[28] 等. 这些宜居带类地行星被视为宇宙中的“新大陆”, 是人类探索生命信号的主要目标. 这些行星有望成为理想的人类第二家园 (“地球 2.0”), 因为其在质量和表面特征上可能与地球相当, 甚至可能拥有适宜的大气和液态水, 从而能够稳定维持生命的存在.

CHES 为什么选择探测近邻类日恒星. 目前, 距离太阳系 32 光年以内发现的行星数目仅占系外行星总数的 2%, 仅有 16 颗是宜居带上的岩石行星, 且均围绕温度较低的红矮星运行 (见图 4). 这类红矮星的表面温度通常低于 3500 K, 远远低于太阳的表面温度 5780 K, 且其空间环境非常恶劣, 包括强烈的耀斑, 这对生命的存活是不利的. 因此, 寻找“地球 2.0”的任务仍然是天文学上的未解之谜. 据理论推断, Kepler 望远镜观测样本中每一颗 G 与 K 型主序恒星 (类日恒星) 周围保守宜居带 (Conservative Habitable Zone) 内存在半径处于 0.5～1.5 倍地球半径的行星的概率大于 0.37[29]. 然而, 令人困扰的是, 在距离太阳系 32 光年以内的类日恒星中, 约 90% 的恒星周围尚未探测到行星存在. CHES 采用的原创性探测方法有望填补这一近邻行星的探测空白, 而真正发现“地球 2.0”似乎已是咫尺之遥.

CHES 将如何了解类地行星的宜居性. 行星大气研究是揭示并刻画行星宜居性的重要探针. 近年来, CHES 团队基于地基望远镜对系外行星大气开展了

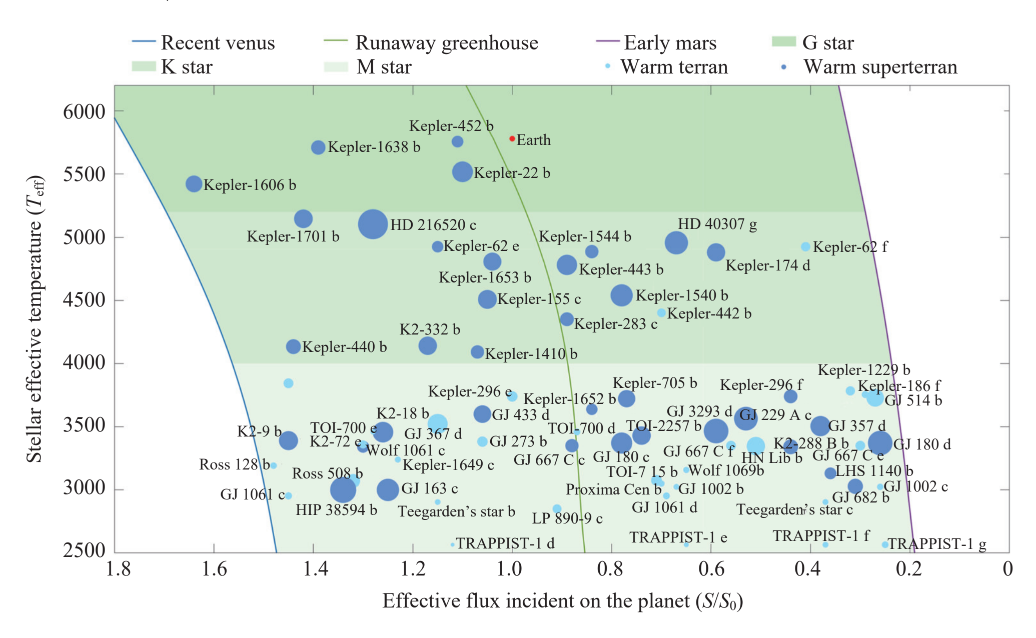


图 4　目前已发现的宜居带行星

Fig. 4　Distribution of the planets in the habitable zone

系统观测研究[30–35]. 随着 JWST 的升空, 系外行星大气的观测研究进入了崭新的阶段. 通过 JWST, 天文学家以极高的精度成功地在气态巨行星的大气中探测到包括水、一氧化碳、二氧化碳、钠、钾等多种分子和原子[36–40], 首次以二氧化硫揭示热木星和暖海王星大气的光化学过程[41,42]; 首次判别系外行星大气的云种类[43]; 首次在宜居带亚海王星发现甲烷主导的大气及疑似生命标记物光谱信号[44]. 然而, 对小尺寸行星, 尤其是类地行星的大气刻画尚未取得重大突破, 例如被寄予厚望的最易于开展凌星大气观测的 TRAPPIST-1 行星系统. 一方面, 红矮星的恒星活动极大地限制了以凌星透射谱为代表的间接探测手段[45]; 另一方面, 热发射谱或相位曲线的测量也表明处于较内轨道的两颗类地行星不存在大气[46,47] . 因此, 对于红矮星宜居带内的地球 2.0 是否能够维持宜居性, 目前面临极大的挑战. CHES 将发现大量近邻类日恒星宜居带类地行星, 非常适合开展高对比度直接成像光谱探测, 将为行星大气的宜居性刻画预先筛选核心观测样本.

从行星形成的角度来看, 关于系外宜居行星的形成演化仍有许多未解之谜. 例如, 在行星形成过程中, 水的来源、大气的维持以及有机物的生成等条件都是影响一个行星是否具备宜居性的重要因素[48,49]. 行星系统中的原行星盘特征, 气态巨行星是否存在及行星是否经历过轨道迁移等因素, 都将直接影响最终行星的宜居性[50,51]. CHES 任务将提供行星的三维轨道和真实质量等参数, 从行星形成演化的角度准确限定行星的宜居性, 为此提供了关键信息.

CHES 将发射一个 1.2 m 级口径的高精度天体测量空间望远镜, 实现微角秒级星间距的测量精度, 巡查太阳系近邻 10 pc 以内的 100 个类日恒星, 寻找近邻的宜居带类地行星或超级地球, 全面普查近邻行星数目、行星真实质量和三维轨道等信息 (见表 2). 此外, CHES 的高精度天体测量方法可精确确定恒星距离 (见图 5), 进而更好地研究恒星的特性, 尤其是恒星大小、质量、光度、哈勃常数等, 这将直接影响诸多关键性科学问题, 例如星系的结构、距离, 宇宙的膨胀, 暗物质的分布等领域[21].

本文重点介绍 CHES 的科学目标、有效载荷配置、任务总体设计、关键技术及最新进展.

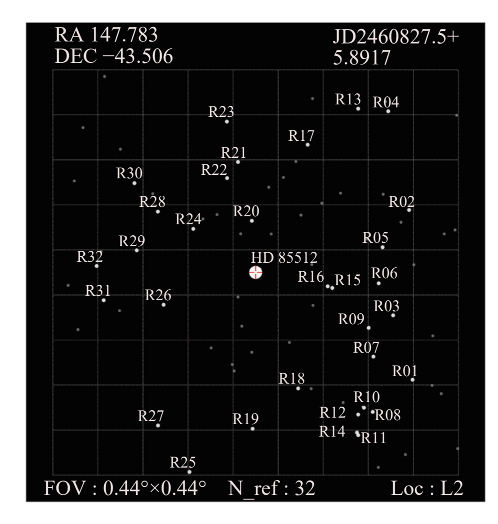
1 科学目标

CHES 的核心科学目标涵盖近邻宜居带类地行星的搜寻 (核心科学目标一) 以及对太阳系近邻行星的全面普查 (核心科学目标二). 在拓展目标方面, CHES 还涉及宇宙学、暗物质和黑洞的研究. 通过实现这些科学目标, CHES 将有望回答一系列关键科学问题, 例如太阳系近邻恒星周围的宜居带类地行星系统有哪些, 类地行星的轨道特征是什么, 其形成、演化和行星宜居性的一般规律如何及行星的内部结构和分布特征怎样等问题.

表 2 目标恒星实例

Table 2 Examples of target stars

Hipparcos Catalogue (HIP)	Stellar name	V magnitude	Stellar spectrum (Type)	Distance/ pc	Astrometric wobble/ μas (1 $M_{\rm earth}$)	Astrometric wobble/ μas (5 $M_{\rm earth}$)
71683	α Cen A	0.0	G2V	1.34	2.22	11.11
71681	α Cen B	1.4	K1V	1.34	1.72	8.60
108870	ϵ Ind	4.7	K5V	3.6	0.55	2.76
96100	σ Dra	4.7	K0V	5.8	0.39	1.93
3821	η Cas	3.5	G0V	6	0.54	2.68
22449	π3 Ori	3.2	F6V	8	0.47	2.34
1599	ς Tuc	4.2	G0V	8.6	0.36	1.78
27072	γ Lep	3.6	F6V	9	0.41	2.06
105858	γ Pav	4.2	F9V	9.2	0.33	1.67
14632	ι Per	4.1	G0V	10.5	0.34	1.68



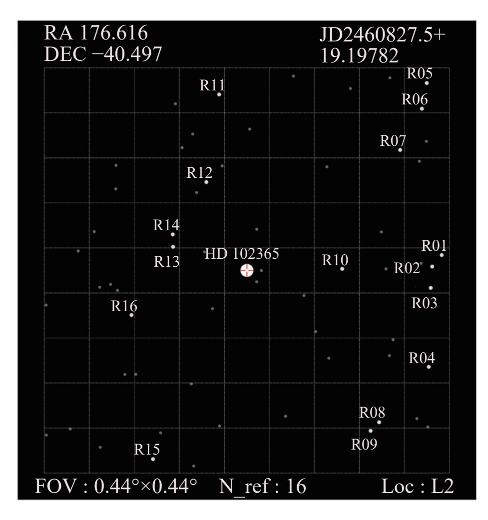


图 5 CHES 任务中目标星 HD 85512 与 HD 102365 和参考星选取示例

Fig. 5 Examples of the target stars HD 85512 and HD 102365 with their references stars for CHES

1.1 核心科学目标一: 近邻宜居带类地行星的搜寻

在太阳系近邻 (10 pc 以内) 约 100 颗 F, G, K 等类型恒星周围搜寻位于宜居带的类地行星, 发现近邻宜居带类地行星. 相比于国际上其他系外行星探测计划, CHES 将专注于对宜居带内的类地行星进行高精度探测. 这项任务的主要科学目标包括确定太阳系近邻是否存在系外宜居带行星及宜居带行星的分布状况和发生概率 (见图 4). 通过 CHES 在太阳系近邻搜索宜居带行星, 将能够回答这些行星在太阳系周围的分布情况, 这是科学界和大众最为关注的问题之一, 尤其是那些位于宜居带内的类地行星.

1.1.1 宜居带类地行星

截至 2024 年 1 月, 人类已发现了 69 颗位于宜居带的系外行星候选者, 其中大多数位于红矮星周围, 主要通过凌星测光技术与视向速度法进行探测. 然而, 凌星方法只能测量行星的大小而非质量, 而视向速度法只能测量行星的最低质量 (所有这些行星的最低质量都远比地球大), 因此尚无法确认这些行星是否为宜居带类地行星. Kepler 所发现的位于宜居带的行星候选体, 普遍距离较远 (1000～3000 光年), 且距离测量误差较大, 难以通过其他观测手段验证和进一步甄别; 而大部分宜居带行星位于红矮星之外, 这类恒星紫外辐射强, 周围行星的大气稳定性还不确定, 因此这些宜居带类地行星是否宜居还有争议. 由于观测数据的限制, 部分宜居带类地行星缺少质量, 大小等关键信息, 是否是类地行星有待商榷. 因此客观地讲, 到目前为止尚未发现真正的“另一个地球”.

1.1.2 近邻恒星周围类地行星的探测

宜居行星的探测面临着高精度的要求, 而地面探测设备由于大气扰动等因素, 即使采用主动光学等技术, 也很难突破 0.1 µas 精度的极限. 因此, 除了地面光谱技术之外, 空间望远镜成为高精度天体观测的理想选择. 在目前的探测方法中, 视向速度法由于受到恒星活动的影响, 难以有效地探测到类日恒星周围的宜居行星, 且无法获得行星的真实质量. 凌星法则要求行星的轨道面在观测者的视线方向, 因此探测概率较小. 直接成像法根据目前能达到的观测精度更容易发现质量更大位置更远的行星. 微引力透镜方法虽然能够获得距离相对较远的个别行星的信息, 但无法用于探测太阳系近邻的系外行星. 目前, 国际上还没有具备太阳系近邻宜居带类地行星探测能力的空间项目和计划. CHES 拟采用的高精度相对天体测量方法具有观测到太阳类型恒星周围的宜居行星、获得其真实质量和三维轨道信息的能力. 因此, 对于探测宜居带行星以及精细刻画其特征, CHES 项目具有独特的优势.

1.1.3 行星宜居性

研究人员开展了不同类型的恒星周围行星出现率研究, 分析了 Kepler 任务 Q1～Q17 的数据, 估算了半径在 0.5～1.25 R_e 的行星存在于宜居区的概率, 发现在 F, G, K 等类型的恒星周围, 宜居行星的存在概率分别为 0.66 ± 0.14, 1.03 ± 0.10 和 0.75 ± 0.11[52]. 据此, CHES 任务估计可探测到宜居行星数目约 50 颗.

另外, CHES 探测到的太阳系近邻宜居带类地行星非常适合开展后续高对比度直接成像观测[20,53–57]. 通过反射谱或热发射谱对行星大气属性的刻画, 可以回答诸如该行星是否具有宜居性、是否存在潜在生命活动标记物光谱特征等关键科学问题[58]. 以距太阳 6.5 pc 的 HD 219134 行星系统为例 (见图 6), 假定其宜居带存在一颗系外孪生地球, 利用一台 6 m 级空间望远镜进行直接成像光谱观测, 在星冕仪内工作角抑制比达到 10^{-10}、望远镜总透光率为 15% 的条件下, 若总累计曝光 100 h 将能以约 13 的信噪比探测到水分子, 约 4 的信噪比探测到氧气分子; 对水分子和氧气分子的体混合比测量精度将能达到约 0.2 dex. 图 7 给出了将该仿真模拟进一步应用到全部 CHES 目标星的情况. 若其宜居带存在系外宜居行星, 那么 100 h 的曝光时间将能分别在 91% 和 25% 的近邻恒星的宜居带地球 2.0 大气中以大于 3 的信噪比探测到水分子和氧气分子. 因此, CHES 对宜居行星的搜索发现将大大提高后续直接成像光谱观测空间任务 (例如"觅音计划"等) 的效率, 使其能够直接跳过搜寻阶段, 将宝贵的观测资源聚焦于宜居行星的大气精细刻画, 进而表征生命信号.

1.2 核心科学目标二: 太阳系近邻行星的普查

探测 10 pc 内 F, G, K 等类型恒星周围, 轨道周期在 30 天至 10 年的行星, 大于 1 倍地球质量的行星, 给出其真实质量和三维轨道参数, 建立完备的近邻系外行星数据库.

深度拓展对系外行星系统的全面认知, 揭示行星形成的历史和轨道演化特征. 目前的系外行星探测方法存在着明显的选择性, 尤其是在视向速度和凌星法方面. 这些方法往往更适用于发现轨道周期较短、质量较小的行星, 同时行星质量无法解耦, 或受限于比较特殊的轨道构型. CHES 的高精度测量探测能力使其能够全面、精确地开展对近邻恒星行星系统的完备性研究.

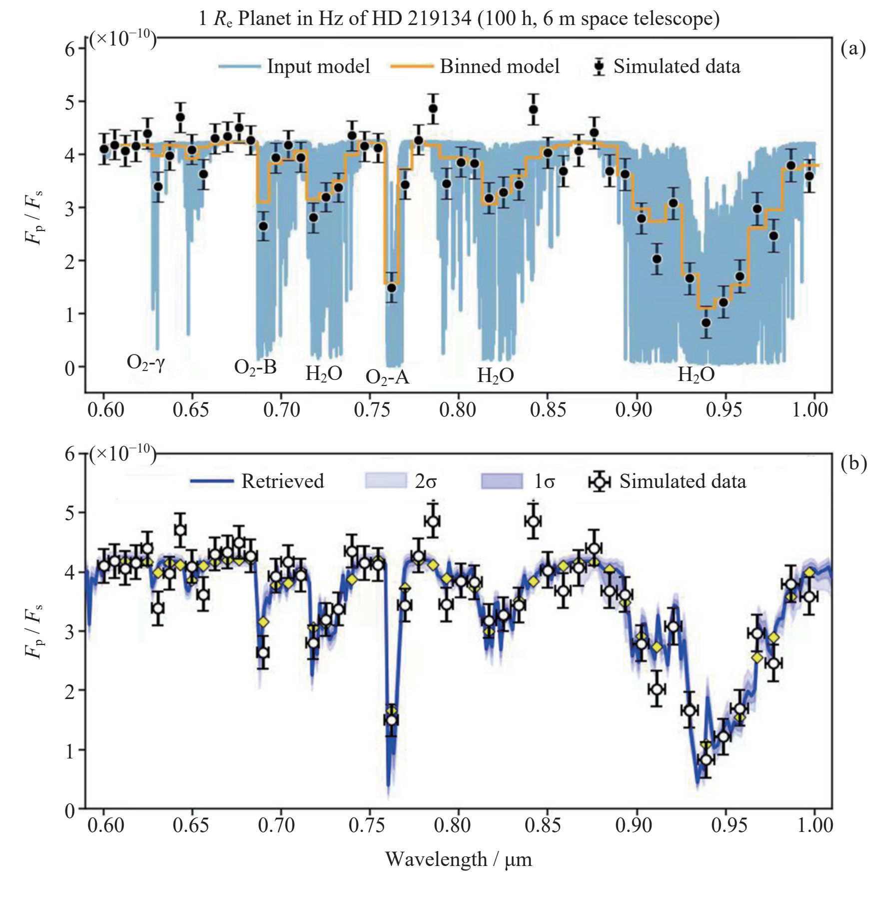


图 6 以假想的 HD 219134 宜居带的"地球 2.0"为例进行的大气反射谱观测仿真分析

Fig. 6 Analysis of the simulated reflected spectrum for a hypothetical Earth twin in the habitable zone of HD 219134

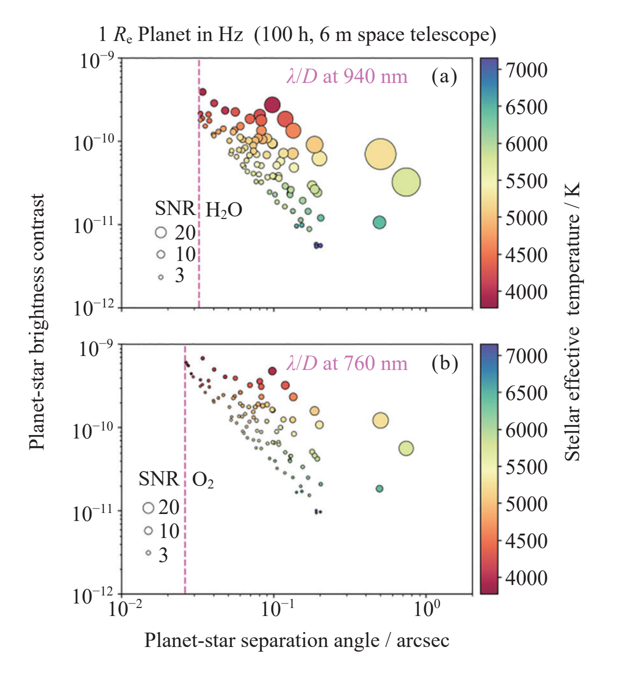


图 7 使用 6 m 级空间望远镜观测 CHES 目标星宜居带孪生地球大气中 H_2O 和 O_2 的预期信噪比

Fig. 7 Predicted SNR of H_2O and O_2 observed in the atmospheres of Earth twins in the habitable zone of CHES target stars using a 6 m space telescope

1.2.1 近邻行星的普查

行星形成理论认为恒星周围的行星系统是普遍存在的, 且系统内行星质量分布与太阳系行星的分布相类似; 但迄今为止人们发现的大部分系外行星的质量远大于地球质量, 这主要是由于观测方法的选择效应: 凌星方法更易于发现体积大的行星, 而视向速度方法更易于发现质量大的行星. 从 Kepler 公布的数据来看, 行星半径分布显示在 1.5～2.0 R_e 之间存在显著的分布鸿沟, 行星半径小于 1.14 R_e 的区域完备性较差[59–63], 这种分布特点也可能意味着某些尚未被揭示的规律. CHES 所具备的高精度探测能力不仅可发现近邻恒星周围的宜居行星, 亦可对太阳近邻的行星系统开展全面普查探测. 通过任务实施, 将更全面、系统地了解系外行星系统的轨道特征、形成和演化历史, 从而最终探讨太阳系是具有普遍性还是独特性的问题.

1.2.2 行星的真实质量、三维轨道及其形成演化

除了行星的轨道特征以外, 行星的内部结构亦是决定行星是否宜居的一个重要因素. 例如前文所述, 行星宜居性通常指其具有固态或液态的表面, 能维持液态水存在、适宜的温度范围及表面大气的存在等[58]. 因此若能获得行星的真实质量, 并从质量–半径关系中更加精准地得到行星的内部结构信息及表面大气特征[60,64]. 通过对目前观测到的系外行星质量–半径关系的分析, 研究表明行星大气含量的比值存在着相当大的不确定性. 根据经典的行星形成理论, 例如核吸积理论的分析揭示, 大气含量与内部结构直接影响了行星的演化阶段, 以及在演化过程中是否经历了气体吸积的过程等. 这与行星的形成和演化过程密切相关. 因此, 通过 CHES 任务获取行星的真实质量可限定行星的物质组成、推测其形成演化过程, 以及完善目前的行星形成理论提供有力的支持.

多行星系统的三维轨道信息直接与其起源与演化密切相关. 系外行星的大量发现带来了行星系统演化在认知上的突破: 行星系统呈现出复杂多样的特征. 而多行星系统的三维结构不仅有助于深入理解行星系统的起源和演化, 还能够提供从统计学角度认识行星系统迁移过程的机会. 这样的动力学过程在长时间尺度上对系外行星的宜居性产生重要影响[50,65,66]. CHES 所能提供的太阳系近邻多行星系统中行星的精确质量和三维轨道信息将成为最为珍贵的观测依据, 必定极大地拓展人类对行星系统的认知和理论研究.

此外, 鉴于对初始条件的极大依赖, 目前的行星形成理论尚未能够准确预测行星的形成物理图像[50,67–73]. CHES 对近邻多行星系统的观测不仅探测宜居带的类地行星, 还涵盖了超级地球、温暖海王星、类木行星等天体, 这将为区分不同行星形成理论所需的信息 (例如原始星云表面密度等) 提供强有力的约束, 是 CHES 相较于其他探测计划的独特贡献之一.

1.2.3 行星系统的多样性

大量的天文观测研究表明 (例如热木星和钻石行星的发现), 系外行星系统呈现出与太阳系行星截然不同的特征[74–82]. 目前已知的系外行星, 根据其轨道特性和质量分布等, 可分为多种类型, 包括热木星、温木星、冷木星、温海王星、超级地球等[11,28,83,84](见图 1). 然而, 系外宜居带行星仍然占总数的相对较少比例, 仅约占 1%(69 颗), 其中大部分是超级地球和类木行星, 而岩石类宜居带行星仅有 29 颗 (见图 4). CHES 任务将专注于太阳系近邻的类日恒星周围寻找宜居带内的岩石类行星, 为系外宜居行星的探测开辟新的可能性.

CHES 在国际上首次全面、精确地探测行星系统, 将为人们带来更多关于行星系统与行星科学认知方面的发现和突破.

1.3 拓展科学目标: 宇宙学与暗物质及黑洞的研究

基于高精度的天体测量, CHES 使人们有能力探测 X 射线双星和黑洞候选体, 揭示银河系暗物质分布, 有助于更深入地理解黑洞的形成. 通过开展宇宙学、暗物质和黑洞相关研究, CHES 有望回答有关星系结构、宇宙膨胀及暗物质分布等前沿科学领域的诸多问题.

致密天体的精确质量是一个重要科学问题, 而高精度的天体测量能更准确地刻画天体质量. 图 8 给出了 CHES 与 Gaia 卫星对致密天体质量测量的对比 (红色和蓝色误差棒分别表示 Gaia 和 CHES 的质量误差估计, 竖线为钱德拉塞卡/奥本海默极限); 与 Gaia 相比, CHES 能够更准确地获取致密天体的质量, 从而确定天体的类别 (白矮星、中子星或黑洞).

2 有效载荷配置

CHES 的有效载荷为一台高成像质量、高稳定、低畸变的光学望远镜, 采用同轴三反 TMA 光学成像系统, 包括光学子系统、焦平面子系统、在轨标定子系统. CHES 望远镜载荷的包络尺寸为 4.5 m×2.6 m×1.4 m, 重量约为 765 kg, 口径为 1.2 m, 视场为 0.44°×0.44°, 焦距为 36 m, 采用同轴三反 TMA 光学成像系统. 望远镜的工作波段为 500～900 nm,

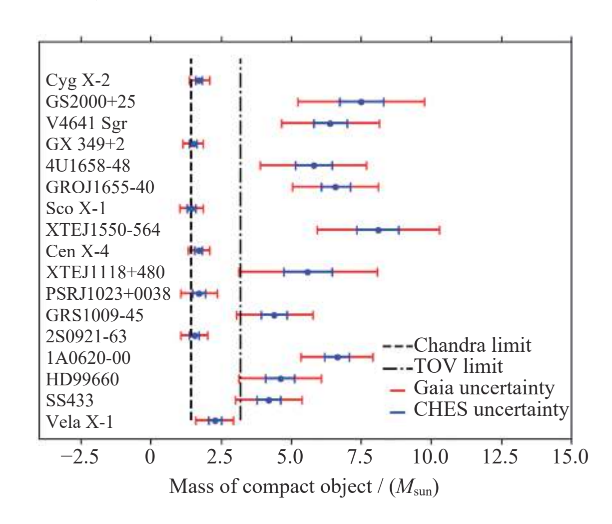


图 8 CHES 与 Gaia 卫星对致密天体质量的测量

Fig. 8 Measurement of the mass of a compact object by the Gaia and CHES satellite

可实现全视场近衍射极限成像. 图 9 给出了 CHES 望远镜光学系统设计光路图[21], 图 10 和图 11 分别给出了 CHES 望远镜结构设计图以及望远镜 1/6 缩比样机[21].

望远镜 1/6 缩比样机真空实验测试结果表明, 样机的全视场波像差优于 $\lambda/20$, 有效载荷光学望远镜系统的技术指标要求见表 3[21].

CHES 采用外差式激光干涉测量手段对焦平面开展在轨标定, 突破了微像素星间距测量关键技术, 测量精度可以达到约 10^{-5} pixel 量级 (见图 12).

2.1 光学子系统

根据有效载荷光学望远镜大口径、大视场、高成

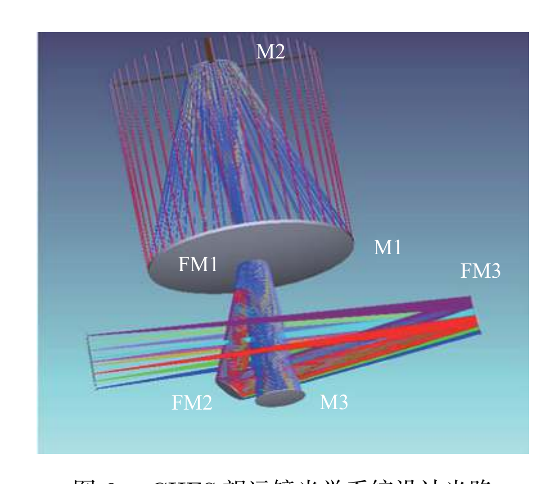


图 9 CHES 望远镜光学系统设计光路

Fig. 9 Optical path diagram of CHES telescope optical system

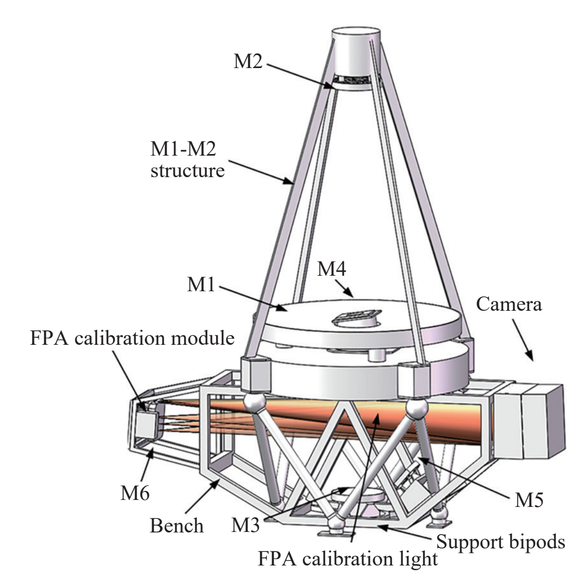


图 10 CHES 望远镜的整体结构

Fig. 10 Overall structure of the CHES telescope

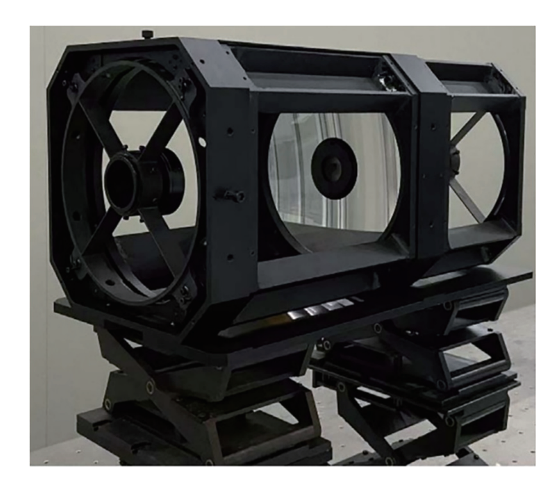


图 11 CHES 望远镜缩比样机实物

Fig. 11 Scaled-down prototype of CHES telescope

像质量、极低畸变等要求, 拟采用同轴三反 TMA 光学结构结合三片反射镜折转光路的设计方案, CHES 望远镜系统结构包含了主镜组件、次镜组件、主次镜桁架组件、平面镜组件 (四镜、五镜、六镜)、探测器组件、焦面标定组件、承力筒等部分, 其中焦面标定组件位于平面反射镜 M6 周边, 通过标定所需激光器产生相应的标定光束.

望远镜在地面加工、装调和检测中, 对光学镜面、结构、探测器等采用重力卸载机构, 降低重力对天地差异的影响, 同时卫星入轨后, 采用次镜进行初始调焦, 目的是降低发射和变轨过程对光学系统的影响, 使其初始光学残差在容差范围内, 完成该调焦后, 各光学元件保持相对位置稳定, 望远镜进入观测工作状态. 望远镜在观测过程中, 由于光学和结构材料差异、温度差别、外界振动等因素的影响, 可能造成望远镜内方位元素的变化, 进而造成光学系统稳定性误差. 因此, 针对这些因素, 主要采用了两个技术手段, 一是通过载荷热控技术控制热变形, 二是通过在轨标定技术实现误差的标定.

2.2 焦平面子系统

焦平面拟选择 sCMOS 探测器, 像素尺寸为 6.5 μm. 焦平面探测分系统由焦平面结构及电控系统组成. 其中, 焦平面结构通过多个 sCMOS 探测器拼接而成, 电控系统由图像传感器阵列电子学系统和电控箱电子学系统组成. 两套电子学系统通过电缆连接. 望远镜与卫星平台之间的数据交换主要通过电控箱来完成. 由于望远镜焦距 36 m, 视场角 0.44°, 所以焦平面的几何尺寸约为 276 mm×276 mm. 为满足如此大幅面焦平面的需要, 拟采用基于 MOSAIC 结构的图像传感器拼接方案. 假设单块 sCMOS 芯片像元尺寸为 6.5 μm, 像素数为 4000 pixel×4000 pixel, 则单块芯片尺寸约 32 mm×32 mm(包括封装尺寸), 拼接后实现全焦平面覆盖需要 9×9=81 片 sCMOS.

表 3 CHES 有效载荷光学望远镜系统的技术指标要求

Table 3 Characteristics of CHES Telescope

序号	系统结构	技术指标
1	口径	ϕ1.2 m
2	焦距	36 m
3	视场	0.44°×0.44°
4	工作波长	500～900 nm
5	焦平面像素大小	6.5 μm×6.5 μm
6	焦平面尺寸	276 mm×276 mm
7	成像质量	全视场近衍射极限 (λ/12波像差)
8	光学畸变	标定后光学畸变残差达到微角秒量级

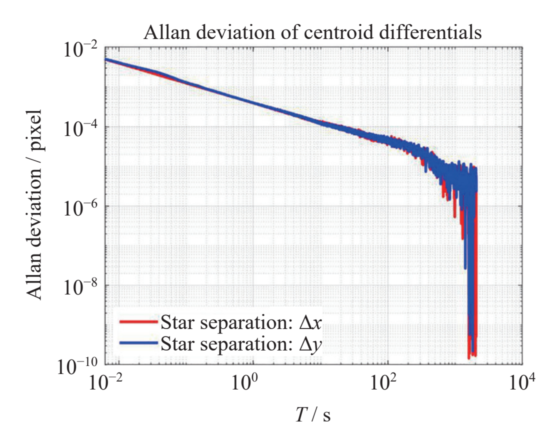


图 12 真空条件下星间距测量结果 (红色线和蓝色线分别为 x 方向与 y 方向星间距 Allan 方差随积分时间的变化)

Fig. 12 Star separation measurement results (Red line and blue line are the Allan deviations with the integration time for direction x and y respectively)

2.3 在轨标定子系统

在轨标定子系统中包含一套激光外差干涉标定模块, 用于对 CMOS 探测器的非均匀响应进行高精度标定, 结合一种基于真实点源响应函数 (PSF) 的星点质心间距测量算法, 可使望远镜焦平面上的星间距测量精度达到微像素量级, 满足 CHES 计划对目标星和参考星星间角距测量精度 1 μas 的要求. 同时, 在

轨标定子系统还充分利用微角秒量级的星间角距测量技术以及畸变梯度反演算法对望远镜的光学畸变进行高精度在轨标定, 从而校正由于卫星调姿或环境温度的变化引起光学系统的畸变分布的变化, 保证目标星与参考星之间星间角距的测量精度.

3 任务总体设计

3.1 探测需求分解

3.1.1 定位精度指标需求

当恒星周围存在行星时, 该恒星受行星引力作用产生的天体测量信号为

$$\alpha = 0.3\left(\frac{M_{\rm planet}}{1M_{\rm earth}}\right)\left(\frac{a}{1{\rm AU}}\right)\left(\frac{M_{\rm star}}{1M_{\rm sun}}\right)^{-1}\cdot \left(\frac{D}{10{\rm pc}}\right)^{-1}\ \mu{\rm as}.$$

其中, $M_{\rm planet}$, $M_{\rm earth}$, $M_{\rm star}$, $M_{\rm sun}$ 分别为行星、地球、所观测的恒星及太阳的质量, a 为行星绕恒星运动的轨道半长径, D 为恒星与观测者的距离. 由此可知, 为探测位于 10 pc(约 32.6 光年) 处的宜居带类地行星, 探测精度则需要达到 0.3 μas. 若要确定一颗行星及其宿主恒星的 12 个参数 (包含 7 个行星参数和 5 个恒星参数), 那么 5 年内至少需要观测 12 组数据才能求解. 在实际探测中, 每组观测数据由 2 h 多次曝光获得. 当然, 增加观测组数可以获得更高的信噪比或适当降低探测精度要求. 为了探测位于 10 pc 处的宜居带类地行星, 在观测次数达到 200 组时, 所需单组数据观测精度必须优于 1 μas.

在 CHES 单组数据的探测精度达到 1 μas 的情况下, 需要对可能影响该探测精度的主要因素进行详细地分析, 其中包括目标恒星的天体测量误差、参考星的天体测量误差、望远镜的测量误差、探测器的标定误差及其他潜在误差. 考虑到天体测量解算精度及有效载荷目前的工程实现能力, 各项影响因素的精度误差分配分别为目标恒星天体测量误差 0.35 μas、参考星天体测量误差 0.58 μas; 有效载荷的误差来源主要有望远镜波像差误差、畸变标校后的残差以及探测器的标定误差. 通过仿真分析可知, 为满足相应的误差分配, 对望远镜成像质量、畸变标定及探测器标定的指标要求如下: 望远镜波像差不大于 λ/12, 最大视场相对畸变标定后的残差不大于 0.36 μas; 探测器标定残差不大于 0.74 μas; 其他误差不大于 0.24 μas[21,85,86].

3.1.2 口径指标需求

望远镜口径取决于两方面的因素. 第一个因素是望远镜的极限探测星等. 根据对目标星和参考星的遴选, 最暗的参考星星等约为 13 等, 同时考虑 CHES 望远镜探测器的工作模式, 其曝光时间为 20 ms. 由于选用的探测器像素大小为 6.5 μm, 为满足微像素星间距算法对奈奎斯特采样数的要求, 望远镜 F 数取 30. 当望远镜口径增大到 1.2 m 时, 系统可以探测到 13 等星, 满足望远镜极限星等的探测要求. 第二个因素是光子噪声对星间距测量精度的影响. 选取的参考星最暗不得低于 13 等, 因此, 按照 CHES 主镜的口径为 1.2 m 估计, 亮度为 13 等的恒星, 经过 2 h 曝光, 接收的光子数目大约为 1.6×10^9 个. 在同时观测 8 颗参考星 2 h 的情况下, 光子噪声引起的误差约为 1 μas$[(\lambda/2D)/\sqrt{8N}]$. 通过 5 年累计观测超过 200 次, CHES 能够测量到强度为 0.3 μas 的信号, 从而满足工程任务对探测精度的要求.

综合权衡国内现有的镜面加工水平、造价、重量以及光子噪声等多方面的因素, 建议选取 CHES 望远镜的口径为 1.2 m.

3.1.3 焦距指标需求

由于确定了 CHES 的主镜口径为 1.2 m, F 数为 30, 因此, 望远镜焦距应为 36 m.

在最短波长 500 nm 处, 对应 PSF 的半极大全宽 (FWHM) 约为 0.1″, 当望远镜焦距为 36 m 时, sCMOS 探测器上对应星像的 FWHM 为 15 μm. 由于拟选择 CMOS 探测器的像素尺寸为 6.5 μm, 因此能够满足 Nyquist 采样定理.

3.1.4 视场指标需求

CHES 实现高精度定位主要是测量目标星和参考星之间的相对位置, 进入 CHES 视场角的参考星至少需要 6～8 颗, 根据候选观测目标的统计, 视场大于 0.44°×0.44°, 就能够实现所有目标星都有至少 6～8 颗参考星, 符合定位所需参考星的数量.

3.1.5 恒星间距测量精度需求

探测器像素尺寸为 6.5 μm, 望远镜焦距为 36 m, 可计算得探测器一个像元所对应的角位移为 0.037″. 如果要实现 1 μas 恒星间距测量精度, 星点像在探测器上的相对定位精度需要达到 2.7×10^{-5} pixel.

3.2 探测原理

CHES 将基于空间高精度相对天体测量技术, 精

确地测量目标恒星中心位置相对于 6~8 颗标准参考星的微角秒级别的星间距变化, 通过这些细微的变化计算目标恒星受行星引力扰动所发生的位移, 探测恒星周围具有真实质量的宜居带类地行星 (见图 13).

3.3 参数仿真平台

借助在行星动力学领域的专业优势及处理光变曲线数据的丰富经验[75,82,87–89], CHES 团队成功研发了一套名为 Nii 的贝叶斯行星轨道参数反演代码, 实现了基于多个参考星的 CHES 仿真观测的相对天体测量数据, 并采用 APT-MCMC 算法进行行星轨道反演[90]. 在单行星系统和双行星系统中, 该轨道反演算法融合视向速度数据, 能够有效地使后验概率分布收敛, 从而准确获取行星的轨道参数和质量.

假设距 10 pc 外存在一个包含太阳、地球与木星的行星系统, 若 CHES 在 5 年的任务对其开展 200 次模拟观测. 基于仿真测量的分析, 拟合两颗行星的天体测量数据[91], 解算并获得地球公转周期与真值接近, 质量与真值相差 10% 以内, 这表明即使在系统中存在类木行星的强干扰情况下, CHES 仍可探测到类地行星. 与此同时, 若 CHES 的科学任务时长超过 5 年, 预计对长周期冷木星的探测能力会进一步提高.

CHES 团队在国际天文联合会发布的 SOFA (Standards of Fundamental Astronomy Service) 软件基础上进行了重新编写, 推出了一套可应用在 Python 平台的、与国际天文联合会的决议相一致的权威算法, 即 PyMsOfa. 随后, 该程序被集成到 CHES 仿真平台中, 以实现 CHES 空间任务中对观测目标恒星与参考星的视场仿真 (见图 5), 并解算获得

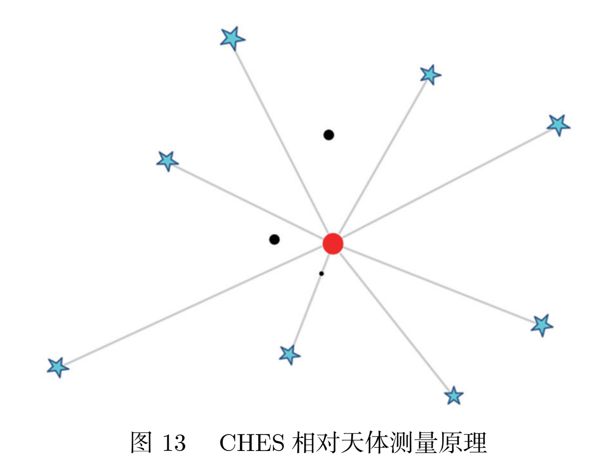


图 13 CHES 相对天体测量原理

Fig. 13 Schematic of relative astrometry method for CHES

的天体测量数据[92]. 图 14 给出 Alpha Centauri A 周围类地行星的天体测量轨道反演模拟. Alpha Centauri A 位于半人马座, 与 Alpha Centauri B 及 Proxima 组成三合星系统, 距地球 1.34 pc, 是太阳系最近的“邻居”, 同时也是 CHES 的目标星之一. Alpha Centauri A 为 G2 V 型恒星, 质量约 1.06 $M_{\rm sun}$, 视星等为 0.01. 由于 Alpha Centauri A 周围尚未发现行星, 可以假设存在一颗质量为 1 $M_{\rm earth}$, 距中央恒星 1 AU 的行星 Alpha Centauri Ab, 其产生相应的天体测量信号强度为 2.1 μas. 若 CHES 在 5 年内以 1 μas 的测量精度对其观测 30 次, 基于生成对应的时序仿真天体测量数据, 拟合后可获得该系统类地行星的轨道参数.

进一步系统研究目标恒星活动性对高精度天体测量的影响. 研究结果表明, 由于恒星活动性导致的天体测量误差, 超过 90% 的恒星的光心抖动低于 1 μas. 大多数目标的恒星活动性对探测宜居行星的影响很小, 满足了目标恒星天体测量精度的误差分配约束. 此外, 模拟仿真结果显示, 在 CHES 任务中, 约 95% 的类日恒星周围的宜居带类地行星的探测率

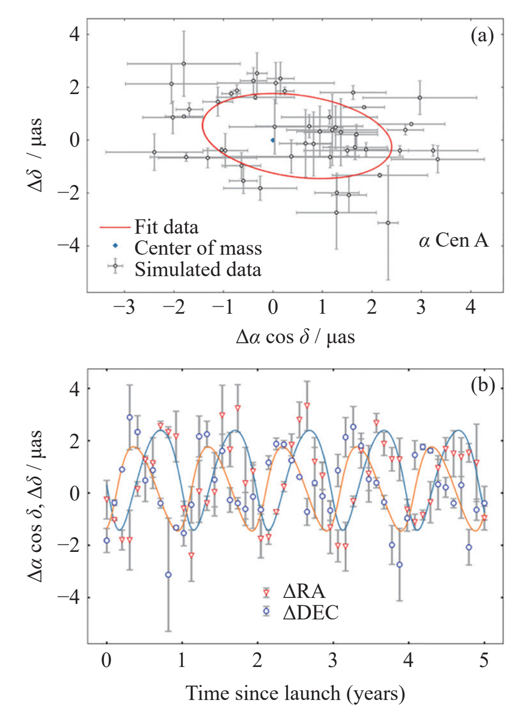


图 14 Alpha Centauri A 周围类地行星的天体测量轨道反演模拟

Fig. 14 Astrometric orbit retrieval simulations for terrestrial planets around Alpha Centauri A

超过 80%[93].

针对 CHES 卫星发射后在日地 L2 的运行情况, CHES 团队细致开展对目标恒星观测的仿真策略研究. 图 15 给出了全部目标星在天球上的分布, CHES 拟对 100 颗进行为期 5 年的重复观测, 对于每个目标星的观测次数不少于 30 次, 单次观测时间不少于 0.5 h, 平均观测次数约为 100 次. 相关研究表明, 围绕 CHES 核心科学目标–近邻宜居带类地行星的搜寻与太阳系近邻行星的普查, 在任务中可用于目标星的累计观测时间约 25120 h, 占总时间的 86%; 其余观测时间约为 4100 h, 可开放用于拓展科学目标课题, 例如双星或黑洞研究等[94].

3.4 卫星平台

CHES 卫星由卫星平台和有效载荷组成, 分为服务舱、推进舱和载荷舱三部分 (见图 16[21]). 卫星平台主要由结构、热控、电源、测控/数传、姿轨控、星务等分系统组成, 为有效载荷提供能源、通信、热控等运行环境保障. 有效载荷为一台高成像质量、高稳定、低畸变的光学望远镜, 包括光学系统、焦平面、控温仪、稳频激光器和数据处理系统. 针对 CHES 卫星关键难点技术, 实现了卫星系统的高稳定度姿态控制精度及热控精度等. 通过卫星系统方案论证及大系统可行性分析等, 为 CHES 项目的后续发展提供良好的平台和坚实的基础. 卫星总体主要技术指标详见表 4[21].

CHES 卫星采用三轴稳定姿态控制方式, 具备惯性定向三轴稳定姿态和姿态机动能力, 配置 12 台 μN 级推力的冷气微推力器用于任务期间载荷观测需要的高稳定度姿态控制, 12 台 20 mN 冷气微推力器做入轨姿态控制和卸载、反作用飞轮做姿态机动和常

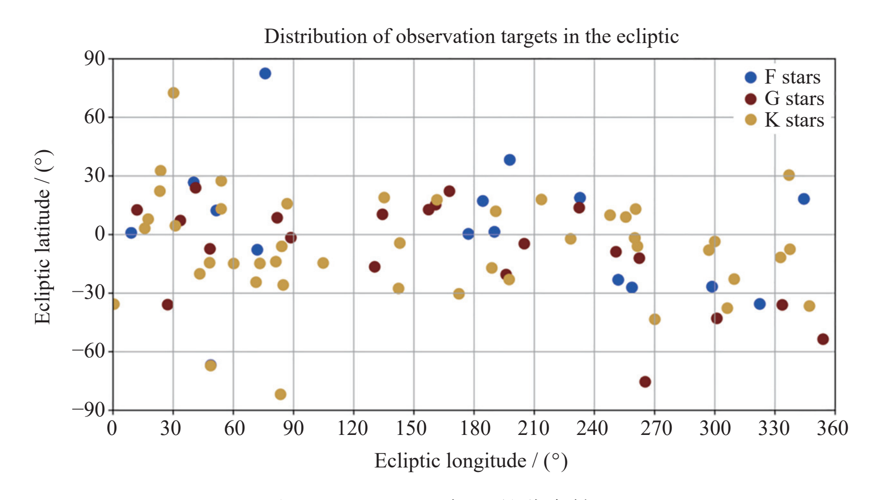


图 15 CHES 目标星的分布情况

Fig. 15 Distribution of CHES target stars

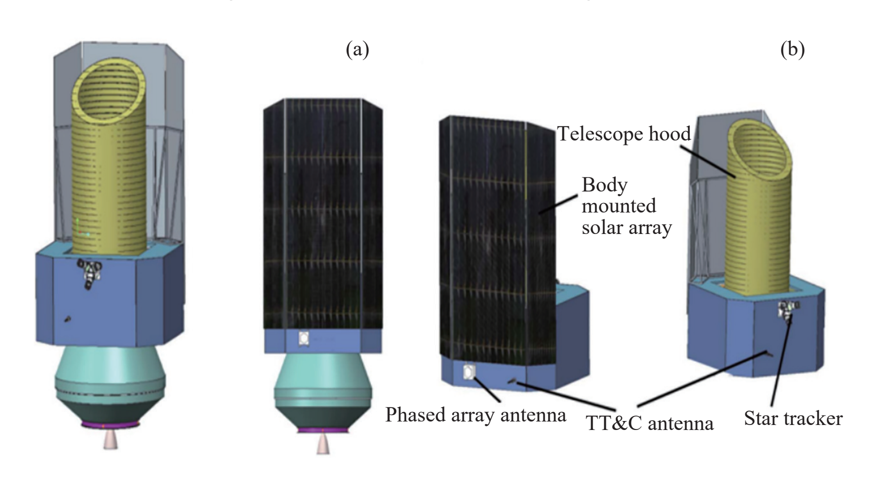


图 16 CHES 卫星系统组成

Fig. 16 CHES satellite layout

规姿态控制, 配置 2 台 40 mN 推力的霍尔电推力器用于任务期间的轨道维持. 卫星采用太阳电池阵与蓄电池组联合供电方案, 太阳电池阵固定安装于卫星的 $-x$ 面、$\pm y$ 方向, 安装于 $\pm y$ 方向的帆板与 $-x$ 方向帆板成一定夹角, 总贴片面积不小于 11.8 m², 末期功率 1493 W, 采用 120 Ah 的锂离子蓄电池组, 满足整星供电需求. 采用 X 频段测控数传一体机, 满足测控需求; 配置相控阵天线, 数传信息速率为 20 $\mathrm{Mbit \cdot s^{-1}}$, 配置 1 Tbits 固态存储器, 用于载荷数据存储回传.

采用分级热设计, 针对载荷的热控要求及轨道特殊的热环境, 开展专项设计, 采用主动热控及被动热控相结合的方式满足整星的热控要求.

CHES 卫星高稳定度姿态控制、高精度热控关键技术承载 CHES 卫星任务观测期间载荷望远镜成像稳定任务, 负责载荷指向要求的 0.07″指向精度和 0.0036″/0.02 s 高稳定度惯性定向观测, 要求温度控制精度应该达到每次观测时间 (2 h) 内小于 45 mK.

综合考虑载荷观测效率, 卫星姿态稳定度、热控

表 4 卫星总体主要技术指标

Table 4 Main technical specifications of the satellite

项目		技术指标
质量	整星起飞时	2930 kg(CZ-3 C@GTO运载能力约3.8 t)
尺寸		ϕ3761 mm ×6487 mm
热控	方式	主动热控方式和被动热控方式相结合
	望远镜光学系统	工作温度20±5℃, 温度稳定度45 mK
	平台单机, 望远镜其他部分	–15～+45℃
电源	太阳电池阵片	11.8 m²三结砷化镓电池阵
	蓄电池	120 Ah锂离子电池
	母线电压	30±0.5 V
姿控	方式	三轴稳定
	指向精度	0.07″
	指向稳定度	0.0036″ / 0.02 s
推进	推力器	姿控推力器12*(1～50 μN)、姿控微推力器12*20 mN 轨控发动机490 N+12*10 N
	推进剂	推进舱: 840 kg 服务舱: 80 kg
测控	遥测码速率	256, 512, 2048, 4096, 8192 $\mathrm{bit \cdot s^{-1}}$
	遥控码速率	500, 1000, 2000 $\mathrm{bit \cdot s^{-1}}$
数传	工作频段	X频段
	调制方式	QPSK
	信息速率	20, 10, 5 $\mathrm{Mbit \cdot s^{-1}}$; 800 $\mathrm{kbit \cdot s^{-1}}$
	存储容量	1 Tbit
	读写方式	按文件顺序写, 随机读
星务	CPU	AT697
	主频	80 MHz
	PROM	128 kByte
星箭接口	连接分离方式	包带
	星箭连接环	1194 A
寿命与可靠性	工作寿命	5年
	可靠度	寿命末期优于0.65

精度的极高要求, 任务轨道选择 L2 点 Halo 轨道. 运载将卫星送入倾角 28.5°的停泊轨道 (200 km×35958 km) 卫星轨道机动后进入转移轨道. 经过约 117 d 转移飞行后, 通过小轨道机动进入任务轨道 (见图 17[21]).

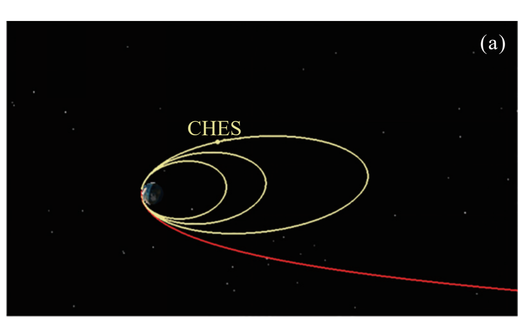
为保证地面可以有效接收卫星数据, 对卫星数传速率进行多档设计, 数传信息速率包括 20, 10, 5 Mbit·s^{-1} 和 800 kbit·s^{-1} 四档, 增加 10, 5 Mbit·s^{-1} 和 800 kbit·s^{-1} 三档后可兼容乌鲁木齐 25 m、青岛或喀什 18 m、中国科学院遥感与数字地球研究所 12 m 天线作为地面接收设备. 在现有成熟单机的基础上进行适应性修改, 目前链路余量设计结果下可以有效降低对地面接收设备的要求, 提高数据接收的稳定性和可靠性.

4 关键技术

主要包括三个关键技术: 微像素星间距测量技术、低畸变大视场望远镜光学系统技术和高稳定度姿控、高精度热控技术.

4.1 微像素星间距测量技术

微像素星间距测量技术是基于空间天体测量法



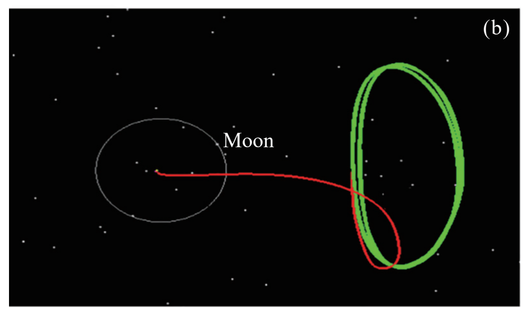


图 17 停泊轨道加速后进入 L2 点转移轨道 (a) 及 L2 点 Halo 任务轨道 (b)

Fig. 17 Mooring orbit accelerates into the L2 transfer orbit (a) and the L2 Halo mission orbit (b)

搜寻太阳系近邻宜居带类地行星的关键技术. 该技术基于外插式激光干涉手段实现探测器的像素特性标定, 以此为基础实现约 10^{-5} 像素级别的星间距测量精度.

采用高频率稳定性激光通过外差方式获得相干光源, 经光纤出射形成干涉条纹, 不同的基线方向可获得不同倾向的干涉条纹, 进而从干涉条纹反演像素特性信息并将其应用于星点像星间距测量. 采用光纤耦合 LED 白光光源, 经球面镜反射获得模拟星点像, 用于开展微像素星间距测量试验. 利用 CMOS 相机采集条纹数据和星点像数据, 用于探测器标定和星间距测量计算.

微像素星间距测量技术试验装置由 6 个子系统构成: 高稳差频激光干涉子系统、伪星源模拟子系统、图像采集与分析子系统、精密隔振支撑子系统、真空试验腔子系统、杂散光抑制子系统. 系统整体设计如图 18 所示, 技术流程如图 19 所示.

项目团队研制的微像素星间距测量技术试验装置是国内第一套微像素星间距测量技术试验装置, 该系统将为近邻宜居行星探测等空间探测任务提供保证. 微像素星间距测量技术试验装置技术创新点是: 高稳多模态动态干涉条纹的形成、基于快速傅里叶变换的迭代优化相位反演算法实现大面阵科学级 CMOS 图像传感器的像素特性全局标定.

4.2 低畸变大视场望远镜光学系统技术

由于 CHES 项目采用窄角天体测量方法, 利用目标星和参考星之间相对的位置变化实现行星测量, 对于望远镜光学系统技术来讲, 光学系统的稳定性是最重要的. 由于望远镜光学和结构材料差异、温度差别、外界振动等因素的影响, 将造成望远镜内方位元素的变化, 进而造成光学系统稳定性误差. 因此, 针对这些因素, 望远镜系统采用畸变在轨定标技术, 实现望远镜稳定性的测量和标定, 同时对载荷系统的温度稳定性、指向稳定性提出要求, 通过卫星平台关键技术攻关实现. 低畸变大视场望远镜光学系统技术主要包括反射镜的研磨、镜头的微应力固定、系统结构稳定性设计、系统轻量化、系统装配及检测等技术.

针对 CHES 望远镜姿态调整或温度变化导致光学畸变发生微小变化的问题, 提出了一种基于畸变梯度反演计算畸变分布的光学畸变在轨标定方案 (见图 20). 该方法不利用现有星表中参考星的定位数据, 而是根据参考星和目标星在单次观测时间 (约 2 h)

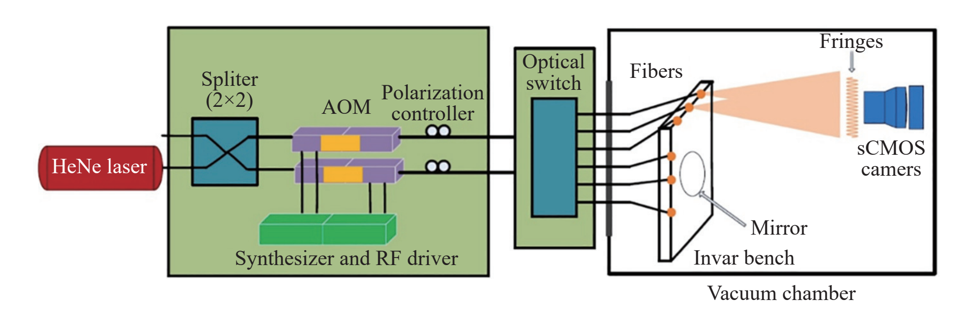


图 18 微像素星间距测量装置系统设计

Fig. 18 Diagram of the micropixel accuracy centroid displacement measurement system

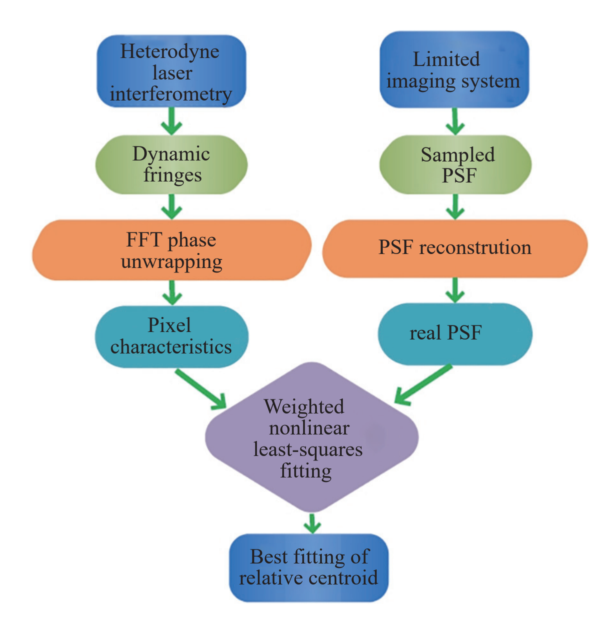


图 19 微像素星间距测量技术流程

Fig. 19 Diagram of the micropixel accuracy centroid displacement measurement

内位置基本一定 (角位移小于 0.1 μas) 这一前提, 利用望远镜指向的不稳定性, 对比中心视场和边缘视场星象点的移动量, 得到星象点出的畸变梯度, 然后根据一定的算法重构整个像面的畸变分布, 从而实现望远镜光学系统畸变量的高精度测量[95].

需要指出的是, 望远镜结构稳定性设计、镜头的轻量化及微应力控制等技术与望远镜口径的关联度相对较大. 由于口径和整体架构的尺寸更大, 全口径望远镜的结构稳定性要求比缩比模型的结构稳定性要求更高. 通过仿真分析发现, 缩比模型的稳定性要求 (例如对温度、振动的稳定性要求) 与缩小比例成正相关性, 因此, 实验中, 可使实验环境参数等比例放大, 从而验证系统能否满足稳定性要求. 对于镜头的轻量化及微应力控制技术方面, 研究团队在大口径望远镜镜面的微应力固定及面形变化的控制方面具有丰富的研究经验, 先后成功研制了多套米级大口径地基或天基望远镜, 并且天基望远镜的在轨状态良好, 因此, 相关技术可以继承应用于本项目全口径望远镜的研制.

4.3 高稳定度姿控和高精度热控技术

CHES 卫星平台涉及的关键技术是高稳定度姿控技术和高精度热控技术.

4.3.1 高稳定度姿控技术

根据载荷观测需求, 卫星指向精度优于 0.07″, 稳定度 0.0036″/0.02 s, 对卫星的姿态控制提出了很高的要求. 为此开展了高稳定度姿控技术攻关, 包括高精度导星敏感器姿态确定技术、高精度推力器姿态稳定控制技术研究, 设计的高稳定度姿态控制技术系统由导星敏感器、高精度光纤陀螺、μN 级姿控推力器、高精度定姿软件模块、高精度微推相平面控制技术等组成 (见图 21).

基于在太极卫星上已进行了 μN 级推力器的研制以及高稳定度控制的算法研究应用, 得到如下仿真结果: 基于 CHES 载荷望远镜的测量精度, 最终稳定度控制精度优于 3×10^{-5}(°)·s^{-1}, 20 ms 内卫星做漂移运动 0.0022″; 控制频率 10 Hz 下, 100 s 内姿态漂移 0.0108″.

通过技术攻关, 完成高稳定度姿态控制技术算法开发, 搭建仿真系统进行验证, 指标满足要求. 基于原有仿真系统, 研制的地面 FGS 图像模拟器应用于高精度姿态控制半物理仿真系统, 实现地面半物理环境下的高稳定度姿态控制算法测试, 完成关键功能验证, 技术成熟度等级为 5 级.

4.3.2 高精度热控技术

CHES 卫星基于星间距测量算法对空间目标进行探测, 对望远镜系统的光学成像质量提出全视场优

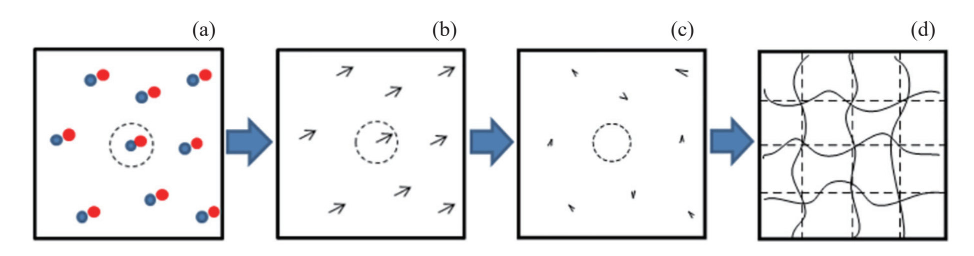


图 20 基于畸变梯度重构畸变分布的在轨标定方法

Fig. 20 On-orbit calibration method sketch map based on distortion gradient reconstruction distortion distribution

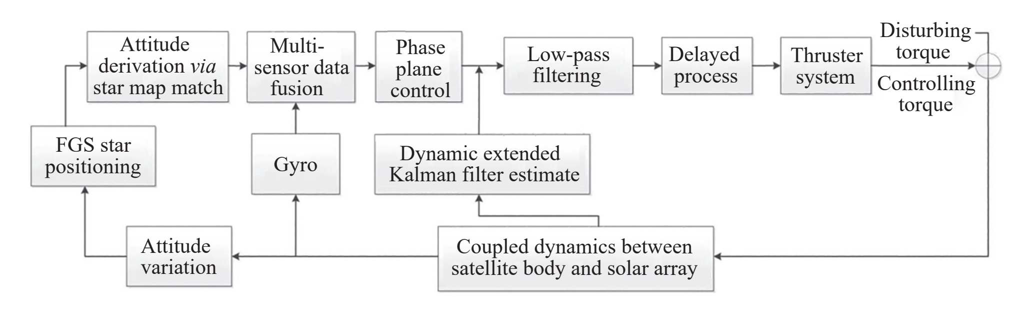


图 21 高精细姿态闭环控制

Fig. 21 High precision closed-loop attitude control

于 λ/12 的要求. 经分析, 在空间中, 引起望远镜光学系统成像质量变化的主要误差源为热和振动, 其中温度波动会造成光学材料和结构材料产生伸缩, 进而引起光学镜面变形和相对位置的变化, 最终导致成像质量发生变化, 有效载荷光学系统在每次观测时间内温度满足 $A\pm0.045$℃, 其中 A 在 15～25℃ 范围内, 对望远镜的光学系统需要专项热控设计, 热控稳定度指标为 45 mK.

高精度热控技术特点如下: 温控稳定性指标极高, 空间望远镜为了保证成像质量, 要求温度控制精度应该达到每次观测时间 (2 h) 内小于 45 mK. 入光口漏热补偿, 大口径空间相机镜筒、主镜、次镜及其桁架结构直接暴露在空间热环境中, 将不可避免地与空间深冷低温环境发生辐射热交换, 使望远镜光学系统及结构部件产生温度梯度, 且对于光学镜片表面无法直接进行温控, 如何补偿这部分光机组件向深冷低温环境漏热是技术难点之一. 大功耗探测器干扰, CHES 卫星空间望远镜采用拼接 CMOS 探测器, 焦平面热耗 100 W, 焦面箱安装于望远镜主体, 其温度将对望远镜主体的控温产生严重干扰, 如何对大热耗电子学单机进行精密温控是难点.

高精度热控技术总体方案包括卫星运行于日地 L2 点轨道, 距离地球约 1.5×10^6 km, 在该轨道上仅需要考虑太阳热流, 地球红外和地球反照热流对卫星的影响可以忽略不计. 因此, 望远镜采用反太阳指向, 通过遮阳板及卫星平台舱挡住大部分太阳辐射热流后, 可为 CHES 望远镜的温控提供一个较为稳定的外部环境 (见图 22).

通过对望远镜光学系统整体温度仿真, 结果表明 CHES 望远镜光学系统温度在 15～21℃ 之间.

针对光学望远镜高稳定度的热控指标开展了技术攻关, 对望远镜进行详细热控设计, 并通过仿真分析, 验证了热控设计的可行性, 仿真结果表明设计方案满足指标要求; 高精度热控技术涉及的遮阳子技术、高精度测温子技术、控温算法子技术以及高稳定度控温子技术的成熟度达到 5 级及以上.

5 结语

在中国科学院先导专项二期空间科学背景型号项目的支持下, 近邻宜居行星巡天计划取得了显著的成果: 深入论证和凝练了 CHES 的科学目标; 突破了低畸变大视场高像质空间望远镜光学系统技术; 突破了 10^{-5} 像素级别的星间距测量技术; 并实现了卫星系统高稳定度姿态控制精度和热控精度方案. 这些关键技术的成熟度达到 5 级, 为后续 CHES 工程的立项提供了重要支持.

CHES 预期首次发现近邻类日恒星的宜居带类

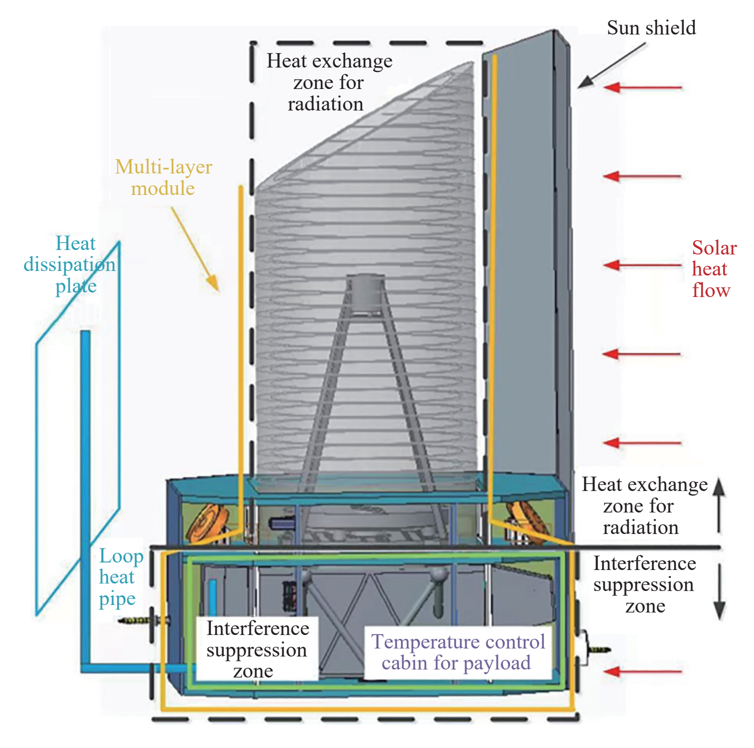


图 22 CHES 有效载荷总体热控方案

Fig. 22 CHES payload’s thermal control design diagram

地行星, 实现从 0 到 1 的重大突破; 发现约 50 颗类地行星或超级地球, 精细刻画黑洞等致密天体的质量. CHES 作为一项中国主导的首次高精度天体测量空间科学项目, 将国际天体测量的精度提高一个数量级, 极大提升中国基本天文学与行星科学的国际影响力, 促进空间科学探测技术的跨越式发展.

参考文献

[1] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, **378**(6555): 355-359

[2] Exoplanet Team. The Extrasolar Planets Encyclopaedia [OL]. [1995-02]. http://www.exoplanet.eu/

[3] National Academies of Sciences·Engineering·Medicine, Division on Engineering and Physical Sciences, Space Studies Board, *et al.* Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s[R]. Washington: The National Academies Press, 2023

[4] European Space Agency (ESA). Voyage 2050 Long-Term Planning of the ESA Science Programme White Papers[OL] (2023-02-07). https://www.cosmos.esa.int/web/voyage-2050/white-papers

[5] Project team of Research on the Development Strategy of Chinese Disciplines and Frontier Fields (2021-2035). Chinese Astronomy 2035 Development Strategy[M]. Beijing: Science Press, 2023: 8 (“中国学科及前沿领域发展战略研究 (2021-2035)”项目组. 中国天文学 2035 发展战略[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 8)

[6] WU Ji, WANG Chi, FAN Quanlin. Review on 11 years of implementation of Strategic Priority Program (SPP) on space science and its prospect[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, **37**(8): 1019-1030

[7] The State Council Information Office of the People’s Republic of China. 2021 China’s aerospace white paper[OL]. [2022-01]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-01/28/content_5670920.htm

[8] LINDEGREN L, PERRYMAN M A C. GAIA: global astrometric interferometer for astrophysics[J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1996, **116**(3): 579-595

[9] CLEMENTINI G, RIPEPI V, LECCIA S, *et al.* *Gaia* Data Release 1. The Cepheid and RR Lyrae star pipeline and its application to the south ecliptic pole region[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, **595**: A133

[10] KOCH D G, BORUCKI W J, WEBSTER L, *et al.* Kepler: a space mission to detect Earth-class exoplanets[C]//Proceedings of SPIE 3356, Space Telescopes and Instruments V. Kona: SPIE, 1998: 599-607

[11] BORUCKI W J, KOCH D G, BASRI G, *et al.* Characteristics of planetary candidates observed by Kepler. II. Analysis of the first four months of data[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **736**(1): 19

[12] RICKER G R, WINN J N, VANDERSPEK R, *et al.* Transiting exoplanet survey satellite[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2015, **1**(1):

014003

[13] BROEG C, FORTIER A, EHRENREICH D, *et al.* CHEOPS: A transit photometry mission for ESA's small mission programme[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2013, **47**: 03005

[14] GARDNER J P, MATHER J C, CLAMPIN M, *et al.* The James Webb space telescope[J]. *Space Science Reviews*, 2006, **123**(4): 485-606

[15] GAO Ming, ZHAO Guangheng, GU Yidong. Space science and application mission in China's space station[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, **30**(6): 721-732

[16] LAUREIJS R, AMIAUX J, ARDUINI S, *et al.* Euclid definition study report[OL]. arXiv preprint arXiv: 1110.3193, 2011

[17] GREEN J, SCHECHTER P, BALTAY C, *et al.* Wide-Field InfraRed Survey Telescope (WFIRST) final report [OL]. arXiv preprint arXiv: 1208.4012, 2012

[18] RAGAZZONI R, MAGRIN D, RAUER H, *et al.* PLATO: a multiple telescope spacecraft for exo-planets hunting [C]//Proceedings of SPIE 9904, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Edinburgh: SPIE, 2016: 990428

[19] TINETTI G, DROSSART P, ECCLESTON P, *et al.* The science of ARIEL (atmospheric remote-sensing infrared exoplanet large-survey)[C]//Proceedings of SPIE 9904, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Edinburgh: SPIE, 2016: 99041X

[20] The LUVOIR Team. The LUVOIR mission concept study final report[OL]. arXiv preprint arXiv: 1912.06219, 2019

[21] JI J H, LI H T, ZHANG J B, *et al.* CHES: a space-borne astrometric mission for the detection of habitable planets of the nearby solar-type stars[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, **22**(7): 072003

[22] CHES collaboration. Closeby habitable exoplanet survey[OL]. [2023-04]. http://www.ps.pmo.cas.cn/CHES/

[23] GE J, ZHANG H, ZANG W C, *et al.* ET white paper: to find the first Earth 2.0[OL]. arXiv preprint arXiv: 2206.06693, 2022

[24] ZHOU Jilin, XIE Jiwei, GE Jian, *et al.* Progress on exoplanet detection and research in space[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(1): 5-18 (周济林, 谢基伟, 葛健, 等. 空间系外行星探测与研究进展 [J]. 空间科学学报, 2024, **44**(1): 5-18)

[25] WANG W, ZHAI M, ZHAO G, *et al.* The Tianlin mission: a 6 m UV/Opt/IR space telescope to explore habitable worlds and the universe[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, **23**(9): 095028

[26] KASTING J F, WHITMIRE D P, REYNOLDS R T. Habitable zones around main sequence stars[J]. *Icarus*, 1993, **101**(1): 108-128

[27] ANGLADA-ESCUDÉ G, AMADO P J, BARNES J, *et al.* A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri[J]. *Nature*, 2016, **536**(7617): 437-440

[28] GILLON M, TRIAUD A H M J, DEMORY B O, *et al.* Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1[J]. *Nature*, 2017, **542**(7642): 456-460

[29] BRYSON S, COUGHLIN J, BATALHA N M *et al.* A probabilistic approach to kepler completeness and reliability for exoplanet occurrence rates[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, **159**(6): 279

[30] CHEN G, PALLÉ E, WELBANKS L, *et al.* The GTC exoplanet transit spectroscopy survey. IX. Detection of haze, Na, K, and Li in the super-Neptune WASP-127b[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, **616**: A145

[31] YAN F, HENNING T. An extended hydrogen envelope of the extremely hot giant exoplanet KELT-9b[J]. *Nature Astronomy*, 2018, **2**(9): 714-718

[32] YAN F, CASASAYAS-BARRIS N, MOLAVERDIKHANI K, *et al.* Ionized calcium in the atmospheres of two ultra-hot exoplanets WASP-33b and KELT-9b[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, **632**: A69

[33] CHEN G, CASASAYAS-BARRIS N, PALLÉ E, *et al.* Detection of Na, K, and Hα absorption in the atmosphere of WASP-52b using ESPRESSO[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **635**: A171

[34] JIANG C, CHEN G, MURGAS F, *et al.* Confirmation of TiO absorption and tentative detection of MgH and CrH in the atmosphere of HAT-P-41b[OL]. arXiv preprint arXiv: 2311.13840, 2023 doi: 10.1051/0004-6361/202347989

[35] YANG Y H, CHEN G, WANG S H, *et al.* High-resolution Transmission Spectroscopy of Ultrahot Jupiter WASP-33b with NEID[J]. *The Astronomical Journal*, 2024, **167**(1): 36

[36] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team. Identification of carbon dioxide in an exoplanet atmosphere[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 649-652

[37] FEINSTEIN A D, RADICA M, WELBANKS L, *et al.* Early release science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRISS[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 670-675

[38] ALDERSON L, WAKEFORD H R, ALAM M K, *et al.* Early release science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec G395H[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 664-669

[39] RUSTAMKULOV Z, SING D K, MUKHERJEE S, *et al.* early release science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 659-663

[40] AHRER E M, STEVENSON K B, MANSFIELD M, *et al.* Early release science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRCam[J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 653-658

[41] TSAI S M, LEE E K H, POWELL D, *et al.* Photochemically produced SO_2 in the atmosphere of WASP-39b[J]. *Nature*, 2023, **617**(7961): 483-487

[42] DYREK A, MIN M, DECIN L, *et al.* SO_2, silicate clouds, but no CH_4 detected in a warm neptune[J]. *Nature*, 2024,

625(7993): 51-54
[43] GRANT D, LEWIS N K, WAKEFORD H R, *et al.* JWST-TST DREAMS: quartz clouds in the atmosphere of WASP-17b[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **956**(2): L32
[44] MADHUSUDHAN N, SARKAR S, CONSTANTINOU S, *et al.* Carbon-bearing molecules in a possible Hycean atmosphere[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **956**(1): L13
[45] LIM O, BENNEKE B, DOYON R, *et al.* Atmospheric reconnaissance of TRAPPIST-1 b with JWST/NIRISS: Evidence for strong stellar contamination in the transmission spectra[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **955**(1): L22
[46] GREENE T P, BELL T J, DUCROT E, *et al.* Thermal emission from the Earth-sized exoplanet TRAPPIST-1 b using JWST[J]. *Nature*, 2023, **618**(7963): 39-42
[47] ZIEBA S, KREIDBERG L, DUCROT E, *et al.* No thick carbon dioxide atmosphere on the rocky exoplanet TRAPPIST-1 c[J]. *Nature*, 2023, **620**(7975): 746-749
[48] ZAIN P S, DE ELÍA G C, RONCO M P, *et al.* Planetary formation and water delivery in the habitable zone around solar-type stars in different dynamical environments[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, **609**: A76
[49] ZHANG X. Atmospheric regimes and trends on exoplanets and brown dwarfs[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**(7): 99
[50] LIU B B, JI J H. A tale of planet formation: from dust to planets[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**(10): 164
[51] ZHU W, DONG S B. Exoplanet statistics and theoretical implications[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2021, **59**: 291-336
[52] TRAUB W A. Kepler exoplanets: a new method of population analysis[OL]. arXiv preprint arXiv: 1605.02255, 2016
[53] GAUDI B S, SEAGER S, MENNESSON B, *et al.* The Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) Mission Concept Study Final Report[OL]. arXiv preprint arXiv: 2001.06683, 2020 doi: 10.48550/arXiv.2001.06683
[54] SNELLEN I, DE KOK R, BIRKBY J L, *et al.* Combining high-dispersion spectroscopy with high contrast imaging: probing rocky planets around our nearest neighbors[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, **576**: A59
[55] WANG J, MAWET D, RUANE G, *et al.* Observing exoplanets with high dispersion coronagraphy. I. The scientific potential of current and next-generation large ground and space telescopes[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **153**(4): 183
[56] SKIDMORE W, TMT International Science Development Teams, TNT Science Advisory Committee. Thirty meter telescope detailed science case: 2015[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, **15**(12): 1945-2140
[57] KASPER M, CERPA URRA N, PATHAK P, *et al.* PCS — A Roadmap for Exoearth Imaging with the ELT[J]. *The Messenger*, 2021, **182**: 38-43
[58] KALTENEGGER L. How to characterize habitable worlds and signs of life[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2017, **55**: 433-485
[59] OWEN J E, WU Y Q. *Kepler* planets: a tale of evaporation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **775**(2): 105
[60] OWEN J E, WU Y Q. The evaporation valley in the Kepler planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **847**(1): 29
[61] JIN S, MORDASINI C, PARMENTIER V, *et al.* Planetary population synthesis coupled with atmospheric escape: a statistical view of evaporation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **795**(1): 65
[62] JOHNSON J A, PETIGURA E A, FULTON B J, *et al.* The California-*Kepler* survey. II. Precise physical properties of 2025 *Kepler* planets and their host stars[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **154**(3): 108
[63] FULTON B J, PETIGURA E A, HOWARD A W, *et al.* The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **154**(3): 109
[64] JIN S, MORDASINI C. Compositional imprints in density-distance-time: a rocky composition for close-in low-mass exoplanets from the location of the valley of evaporation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **853**(2): 163
[65] PAN M R, WANG S, JI J H. Near mean motion resonance of terrestrial planet pair induced by giant planet: application to Kepler-68 system[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, **496**(4): 4688-4699
[66] WANG S, LIN D N C. Dynamical evolution of closely packed multiple planetary systems subject to atmospheric mass loss[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **165**(4): 174
[67] RAYMOND S N, MANDELL A M, SIGURDSSON S. Exotic Earths: forming habitable worlds with giant planet migration[J]. *Science*, 2006, **313**(5792): 1413-1416
[68] MORDASINI C, ALIBERT Y, BENZ W, *et al.* Extrasolar planet population synthesis. II. Statistical comparison with observations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, **501**(3): 1161-1184
[69] CHIANG E, LAUGHLIN G. The minimum-mass extrasolar nebula: in situ formation of close-in super-Earths[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, **431**(4): 3444-3455
[70] HUANG P H, ISELLA A, LI H, *et al.* Identifying anticyclonic vortex features produced by the rossby wave instability in protoplanetary disks[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **867**(1): 3
[71] HUANG P H, DONG R B, LI H, *et al.* The observability of vortex-driven spiral arms in protoplanetary disks: basic spiral properties[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **883**(2): L39
[72] HUANG P H, LI H, ISELLA A, *et al.* Meso-scale instabil-

ity triggered by dust feedback in dusty rings: origin and observational implications[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **893**(2): 89

[73] JIN S, LI S T, ISELLA A, *et al.* Modeling dust emission of HL TAU disk based on planet-disk interactions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **818**(1): 76

[74] JI J H, LI G Y, LIU L. The dynamical simulations of the planets orbiting GJ 876[J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, **572**(2): 1041-1047

[75] JI J, LIU L, KINOSHITA H, LI G. Could the 47 Ursae Majoris planetary system be a second solar system: predicting the Earth-like planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, **631**(2): 1191-1197

[76] JI J H, KINOSHITA H, LIU L, *et al.* The secular evolution and dynamical architecture of the Neptunian triplet planetary system HD 69830[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **657**(2): 1092-1097

[77] WANG S, JI J H, ZHOU J L. Predicting the configuration of a planetary system: KOI-152 observed by *Kepler*[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, **753**(2): 170

[78] WANG S, JI J H. Near 3: 2 and 2: 1 mean motion resonance formation in the systems observed by *Kepler*[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **795**(1): 85

[79] WANG S, LIN D N C, ZHENG X C, *et al.* Departure from the exact location of mean motion resonances induced by the gas disk in systems observed by Kepler[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **161**(2): 77

[80] PAN M R, WANG S, JI J H. The terrestrial planet formation around M dwarfs: *in situ*, inward migration, or reversed migration[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **510**(3): 4134-4145

[81] HUANG X M, JI J H. Extremely inclined orbit of the S-type planet γ Cep Ab induced by the eccentric Kozai-Lidov mechanism[J]. *The Astronomical Journal*, 2022, **164**(5): 177

[82] HUANG X M, JI J H, LIU S F, *et al.* Evolution of planetary obliquity: the eccentric Kozai-Lidov mechanism coupled with tide[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **956**(1): 45

[83] BORUCKI W J, KOCH D, BASRI G, *et al.* Kepler planet-detection mission: introduction and first results[J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 977-980

[84] BATALHA N M, ROWE J F, BRYSON S T, *et al.* Planetary candidates observed by *Kepler*. III. Analysis of the first 16 months of data[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2013, **204**(2): 24

[85] The Theia Collaboration. Theia: faint objects in motion or the new astrometry frontier[OL]. arXiv preprint arXiv: 1707.01348, 2017

[86] NEMATI B, SHAO M, GONZALEZ G, *et al.* The Micro-Arcsecond astrometry small satellite: MASS[C]//Proceedings of SPIE 11443, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. SPIE, 2020: 114430O

[87] JI J H, KINOSHITA H, LIU L, *et al.* Could the 55 Cancri planetary system really Be in the 3:1 mean motion resonance[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **585**(2): L139-L142

[88] JI J H, JIN S, TINNEY C G. Forming close-in Earth-like planets via a collision-merger mechanism in late-stage planet formation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **727**(1): L5

[89] WANG S, JI J H. Near mean-motion resonances in the system observed by Kepler: affected by mass accretion and type I migration[J]. *The Astronomical Journal*, 2017, **154**(6): 236

[90] JIN S, DING X J, WANG S, *et al.* Nii: a Bayesian orbit retrieval code applied to differential astrometry[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **509**(3): 4608-4619

[91] BAO Chunhui, JI Jianghui, TAN Dongjie, *et al.* Simulation observation and orbital retrieval based on CHES satellite[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2023, accepted (暴春晖, 季江徽, 谭东杰, 等. 基于 CHES 卫星的模拟观测与轨道反演 [J] 天文学报, 2023, 已接受)

[92] JI J H, TAN D J, BAO C H, *et al.* PyMsOfa: A python package for the Standards of Fundamental Astronomy (SOFA) service[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, **23**(12): 125015

[93] BAO C H, JI J H, TAN D J, *et al.* Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES). I. Astrometric noise and planetary detection efficiency due to stellar spots and faculae[J]. *The Astronomical Journal*, 2024, accepted

[94] TAN D J, JI J H, BAO C H, *et al.* Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES). II. An observation strategy for the target stars[J]. *The Astronomical Journal*, 2024, submitted

[95] SUN Y H, FANG L, ZHANG H. On-orbit calibration method based on distortion gradient reconstruction distortion[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, **43**(4): 802-808

作者简介



季江徽 男, 1973 年 10 月出生于江苏如东. 现为中国科学院紫金山天文台研究员, 博士生导师, 主要研究方向为系外行星、原行星盘与太阳系小天体等.

E-mail: jijh@pmo.ac.cn